



X Congreso Ibérico de Agroingeniería X Congresso Ibérico de Agroengenharia

Huesca, 3-6 septiembre 2019



Interferometría diferencial como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía

Francisco A. Sánchez-Crespo¹, María T. Gómez-Villarino², Francisco Ayuga², Ana I. García²

¹ C/Abogados de Atocha, 39. 28710 El Molar (MADRID); francisco.scespo@alumnos.upm.es

² Grupo de investigación EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid; gi.eipirma@upm.es

Resumen: Las nuevas misiones espaciales como la Sentinel-1 (Proyecto Copernicus de la Agencia Espacial Europea en colaboración con la Comisión Europea) son capaces de obtener imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar) con una alta frecuencia, resolución, cobertura y, sobre todo, disponibilidad, lo cual permite la aplicación de técnicas como la interferometría diferencial en nuevos ámbitos. El objetivo del presente estudio es analizar la posible aplicación de la técnica de la interferometría diferencial para el estudio localizado de la erosión superficial debido a fenómenos de escorrentía, estudiando los parámetros de cálculo, las limitaciones de aplicación y la interpretación de los resultados. En una primera fase se realizó un estudio cuantitativo contrastando las deformaciones registradas mediante interferometría diferencial con las registradas mediante un LIDAR terrestre (el sistema más preciso disponible actualmente), concluyendo la suficiente capacidad del sistema para medir pequeñas erosiones. En la segunda y actual fase se está realizando un estudio cualitativo en una cuenca agrícola monitorizada (eminentemente cerealista) en Daganzo de Arriba (Madrid) con resultados que muestran una erosión proporcional a la intensidad de lluvia, a la cobertura del suelo en el momento de la precipitación y acorde con lo observado durante las inspecciones visuales. Además, se ha observado que no existe interferencia en los resultados debido a actividades agrícolas que alteran la altura del cultivo como puede ser la cosecha.

Palabras clave: Sentinel, Copernicus, SAR, LIDAR.

1. Introducción

Si bien la técnica de interferometría diferencial a partir de imágenes de radar de apertura sintética no es algo nuevo (las misiones ERS de la Agencia Espacial Europea se remontan a 1991), sí que lo es la resolución, frecuencia de revisitación, cobertura y disponibilidad de imágenes que ofrece la misión Sentinel-1 del Proyecto Copernicus [1] (iniciativa conjunta de la Agencia Espacial Europea y la Comisión Europea), lo que posibilita nuevos usos y aplicaciones.

1.1.- La misión Sentinel-1

La misión Sentinel-1 está compuesta por dos satélites equipados con radares de apertura sintética (SAR) que trabajan en la banda C de las microondas, lo cual capacita a tomar imágenes tanto de día como de noche, e independientemente de las condiciones de nubosidad.

Los satélites Sentinel-1 tienen órbitas casi polares con un desfase de 180° en el mismo plano, de tal forma que cada satélite visita una zona determinada de la superficie terrestre al menos una vez cada 12 días, y cada zona de la superficie terrestre es visitada por alguno de los dos satélites al menos una vez cada 6 días [1].

Los sensores equipados disponen de 4 modos de adquisición: Strip Map, Interferometric Wide Swath, Wave y Extra Wide Swath [2].

El modo Interferometric Wide Swath (IW) tiene una resolución media-alta (5x20 metros), muy buena cobertura (franja de 250 km) y, sobre todo, alta disponibilidad, con las imágenes listas para su descarga pocas horas después de su adquisición. Estas características lo convierten en el modo más adecuado para el presente estudio.

El modo IW captura las imágenes en tres sub-franjas usando la técnica de Observación Terrestre con Barridos SAR Progresivos (TOPSAR - Terrain Observation with Progressive Scans SAR). Cada una de estas sub-franjas se compone de varias ráfagas.

El modo TOPSAR presenta una serie de mejoras sobre el modo ScanSAR precedente, relativos al control electrónico de la orientación de las ráfagas y sincronización entre pasadas que logran mejorar el SNR (Signal to Noise Ratio) y DTAR (Distributed Target Ambiguity Ratio), logrando imágenes con menos ruido y deformaciones [3].

1.2.- Interferometría diferencial

La interferometría en radares de apertura sintética (InSAR) que equipan estos satélites permite la medición precisa del viaje de ida y vuelta de la radiación, registrando la intensidad y la fase de la señal electromagnética en una imagen SAR. Una imagen SAR está compuesta por un mosaico bidimensional de elementos llamados píxeles, cada uno referenciado a una pequeña área de la superficie terrestre o celda. Cada pixel contiene la información de intensidad y fase de la radiación rebotada en su celda o superficie terrestre correspondiente.

La interferometría SAR aprovecha la diferencia de fase entre dos observaciones SAR de una misma área de la superficie terrestre, tomadas desde posiciones del sensor ligeramente distintas, para extraer la información de la distancia a la tierra [4].

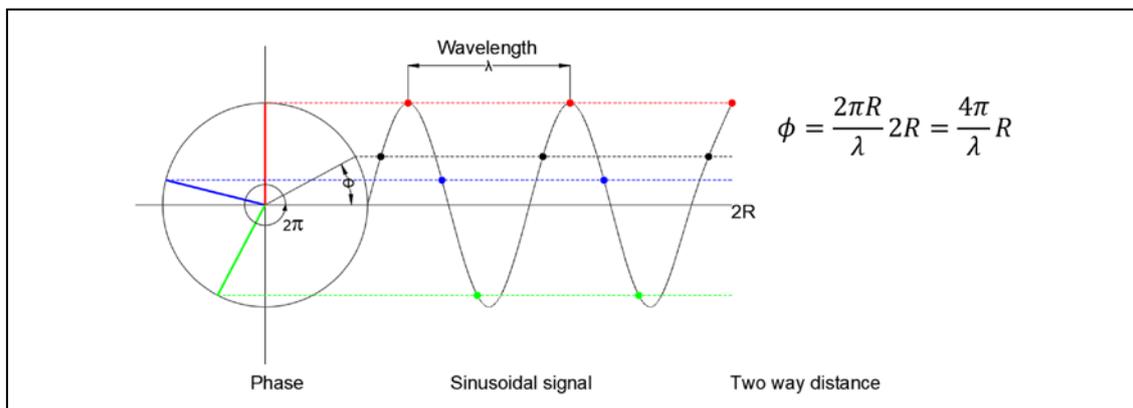


Figura 1: Diferencia de fase. Fuente ESA-TM19 InSAR Principles.

Tras un corrección y mediante la combinación de las diferencias de fases de las dos observaciones, se puede generar un interferograma en donde la información de la diferencia de fase está altamente relacionada con la topografía del terreno [5], y las deformaciones del mismo pueden ser incorporadas a un mapa.

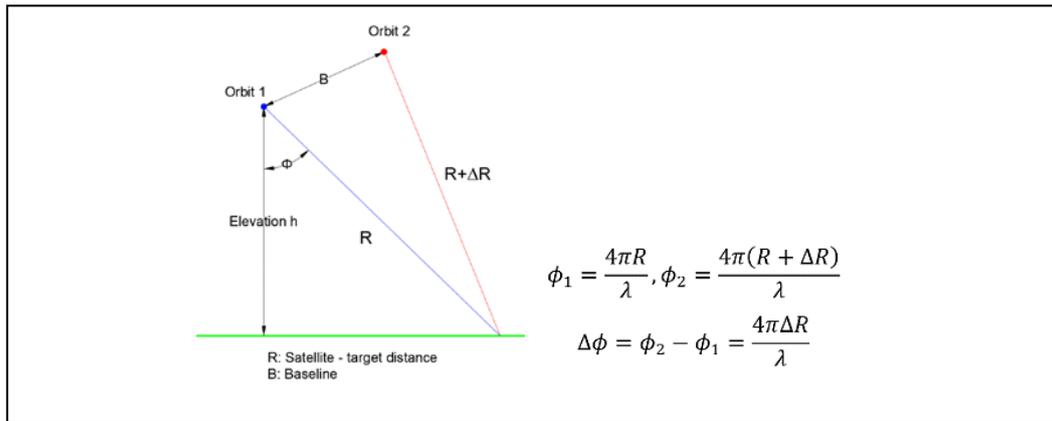


Figura 2: Esquema de la disposición de los satélites en la interferometría diferencial Fuente ESA-TOPS Interferometry Tutorial.

La diferencia de fase puede deberse a 5 factores [4]:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{flat} + \Delta\phi_{elevation} + \Delta\phi_{displacement} + \Delta\phi_{atmosphere} + \Delta\phi_{noise} \quad (1)$$

Flat: Curvatura de la tierra.

Elevation: Topografía.

Displacement: Deformaciones del terreno entre ambas adquisiciones.

Atmosphere: Debidos a las diferencias de humedad, presión y temperatura entre adquisiciones.

Noise: Cambios temporales en los reflectores, volume scattering y ángulos de adquisición.

A través del análisis interferométrico se procura eliminar las fuentes de error (flat, atmosphere y noise) para quedarse tan solo con las contribuciones de interés: elevation (para generar modelos digitales del terreno) y displacement (para analizar los cambios en el terreno).

Si el desfase debido a la topografía es restado al interferograma, la diferencia de fase resultante corresponderá a los patrones de deformación entre las dos fechas de adquisición.

Simultáneamente al interferograma se genera la banda de coherencia, que muestra cuanto de similar son ambas imágenes a nivel de pixel en una escala del 0 (baja) al 1 (alta).

La pérdida de coherencia entre un par de imágenes puede deberse a varios factores [6,7]:

$$\gamma = \gamma_T * \gamma_G * \gamma_V * \gamma_P \quad (2)$$

Temporal: No puede ser evitado, es debido a diferencias en el terreno entre ambas tomas, y precisamente uno de los objetivos de la interferometría diferencial.

Geometric: Debidos a errores en las órbitas de los satélites, puede ser parcialmente eliminado.

Volumetric: Debido a la vegetación existente, no puede ser evitado.

Processing: Debido a errores de cálculo. Debe de ser evitada.

La técnica de la Interferometría diferencial se ha empleado con éxito en el análisis de subsidencias debidas a obra civil, deslizamientos de laderas, terremotos y erupciones volcánicas.

2. Materiales y métodos

Se ha realizado el estudio de las variaciones topográficas en la cuenca del arroyo del Monte (TM Daganzo de Arriba, Madrid), mediante imágenes TOPSAR procedentes de la misión Sentinel-1 y la técnica de la interferometría diferencial.

Al mismo tiempo se ha procedido a monitorizar visualmente las condiciones de la superficie, la cobertura del suelo y los cambios en los cultivos, cárcavas y zonas inundadas.

Los resultados obtenidos del proceso de interferometría diferencial han sido interpretados empleando la información recogida durante las inspecciones visuales.

Para el análisis interferométrico se emplean un par de imágenes obtenidas del Scientist Data Hub de la Agencia Espacial Europea, de tipo IW (Interferometric Wide Swath), SLC (Single Look Capture) y Banda VV (la polarización VV minimiza el efecto de la vegetación pequeña [8,9]).

Se utiliza la herramienta Sentinel Application Platform SNAP Desktop de la Agencia Espacial Europea [10,11] y el algoritmo SNAPHU de la Universidad de Stanford para el “desdoblado” de fase [12,13,14]. Con el análisis mediante esta herramienta de interferometría diferencial de imágenes satélite se pueden detectar pequeñas variaciones (del orden de milímetros) en la elevación del suelo, si bien hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las microondas de la banda C son capaces de penetrar la pequeña vegetación, si bien no las masas arbóreas ni vegetación de hoja o fruto grande [15,16].
- Diferencias de saturación de agua en el suelo entre tomas, puede generar falsas deformaciones [6].
- Las láminas de agua y zonas con abundante vegetación arrojan poca coherencia en los resultados, mientras que los suelos desnudos, pavimentados y edificios arrojan una alta coherencia en los resultados [16].
- Las variaciones en altura del terreno entre una toma y otra pueden deberse a varios factores distintos a los procesos de erosión:

Crecimiento de la vegetación, prácticas de laboreo y cultivo y des/aparición de elementos [26,27,28].

Otros procesos geológicos (fenómenos de expansión de las arcillas, subsidencia del terreno, terremotos, deslizamiento de laderas, disolución de calizas, etc) [17,18,19,20,21,22,23].

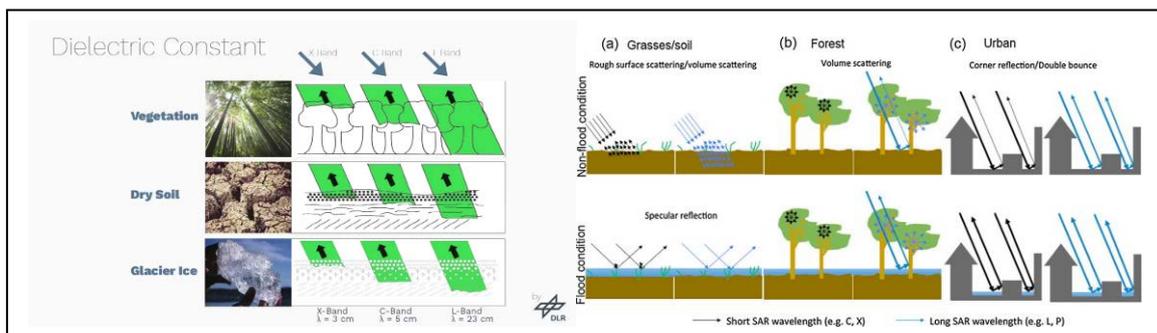


Figura 3. Microondas y constante dieléctrica. Las microondas de la banda C tienen escasa capacidad de penetración en el suelo seco, y ninguna en suelos saturados. Fuente EO College Course “Echoes in Space” [16] y Schumann & Moller [25]

3. Resultados y discusión

Se han seleccionado 3 tomas realizadas a lo largo del tiempo para mostrar las capacidades y limitaciones de la herramienta:

3.1.- Caso con labores agrícolas y apenas sin precipitaciones (15/06/2017 →27/06/2017)

Durante este periodo de tiempo apenas hubo precipitaciones (total 12mm en 12 días), y bastantes parcelas agrícolas cerealistas de la cuenca fueron cosechadas.

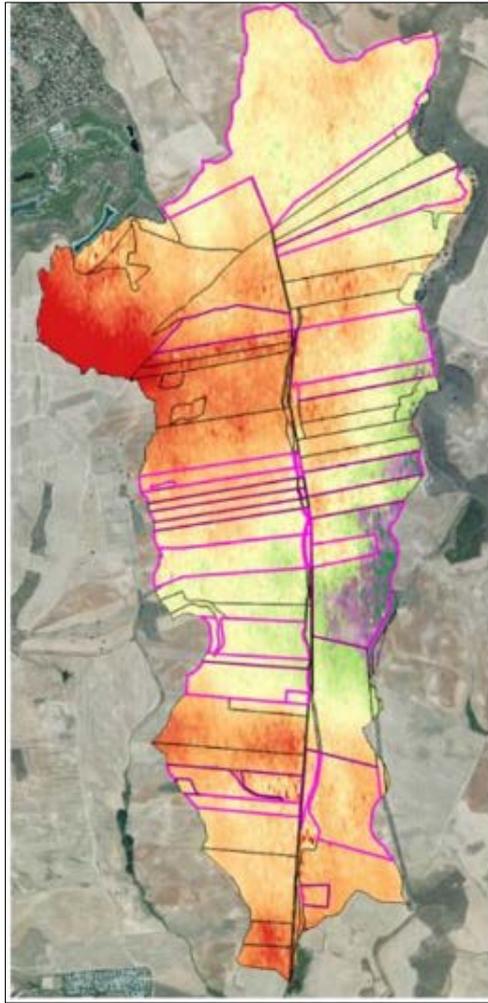


Figura 4: Resultados 15-27/05/2017

La humedad precedente entre ambas fechas era similar.

El resultado del análisis interferométrico arroja una amplitud de deformación en el global de la cuenca (la diferencia entre la celda que más se eleva y la que más desciende) de 8mm.

Entre ambas adquisiciones todas las parcelas marcadas en magenta fueron cosechadas, no observándose diferencias relevantes respecto a las parcelas que no fueron cosechadas.

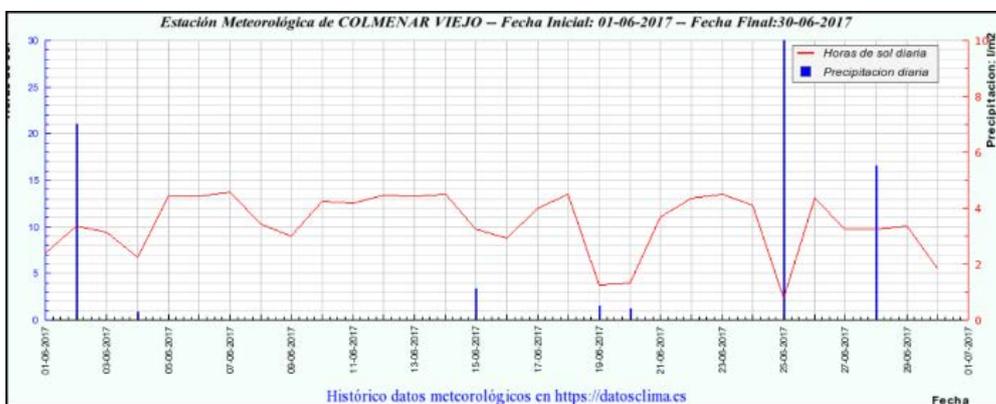


Figura 5: Lluvias en el periodo 15-27/06/2017

Del análisis interferométrico basado en microondas de la banda C de este periodo se puede concluir que:

- 1.- No se ve afectado por cultivos de tipo cerealista.
- 2.- Sus resultados fueron coincidentes con lo observado en campo, y por tanto pueden considerarse como correctos.

3.2. *Caso de intensas lluvias sin labores agrícolas (28/02/2018 →06/03/2018)*

Durante este periodo de tiempo hubo intensas precipitaciones (total 101,5mm en 6 días).

Entre ambas fechas no se observó ninguna actividad agrícola relevante.

La humedad precedente no es la misma entre ambas tomas, estando bastante más cerca de la saturación (incluso con zonas encharcadas como se verá más adelante) en la toma del segundo día.

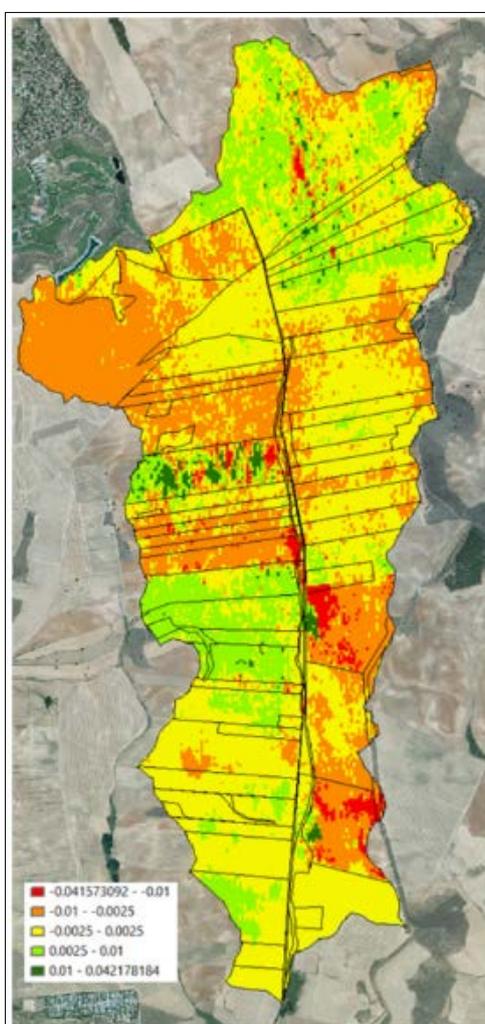


Figura 6: Resultados 28/02/2018-06/03/2018

El resultado del análisis interferométrico arroja una amplitud de deformación superior a los 8 cm, con las siguientes características:

Zonas en color rojo y naranja: Zonas donde se ha detectado erosión, hasta 1cm en las zonas naranjas y entre 1 – 4 cm en las zonas rojas. Se trata de zonas en las que, durante este periodo, el suelo estaba eminentemente desnudo (barbecho).

Zonas en color amarillo: Representan zonas donde no se detectan procesos erosivos o de

sedimentación relevantes. Se trata de zonas en las que, durante este periodo, el suelo estaba cubierto por cultivos de tipo cereal (trigo o cebada).

Zonas de color verde claro: Se trata de extensas zonas en las que se ha observado una ligera elevación (entre 0,25 – 1 cm) del terreno, no explicable por procesos erosivos-sedimentarios. Debido a que era la primera precipitación tras un largo periodo sin lluvias, las explicaciones a este fenómeno son 2:

- 1.- Una posible expansión de las arcillas debido al cambio de humedad en el suelo.
- 2.- Un seguro y fehaciente cambio en la humedad y constante dieléctrica del suelo (durante las visitas se observó que el primer día el suelo estaba seco mientras que el segundo día el suelo totalmente encharcado, por lo que estaba saturado), que provoca un reflejo más superficial si cabe de las microondas de la banda C.

Zonas de color verde oscuro: Durante la inspección visual del segundo día se comprobó que dichas zonas se correspondían con zonas encharcadas o con mucha sedimentación.

Por tanto, para el periodo estudiado, el análisis interferométrico basado en microondas de la banda C fue coincidente con lo observado en campo, y se puede concluir que sus resultados fueron correctos.

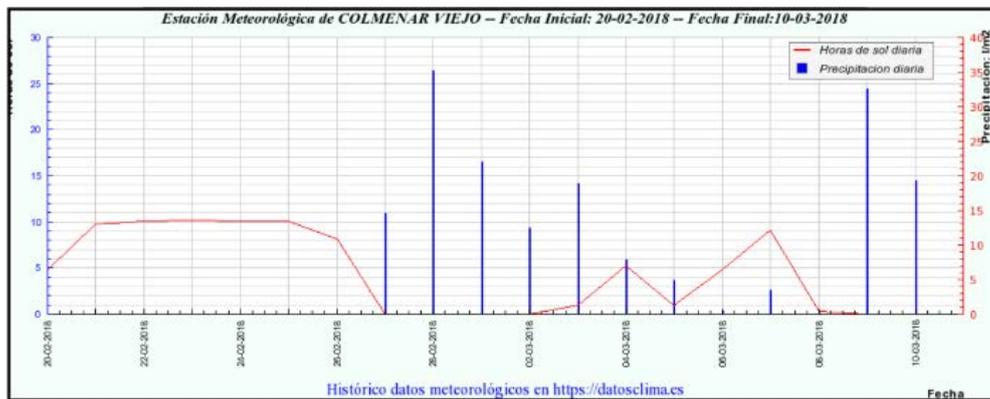


Figura 7: Lluvias en el periodo 28/02/2018-06/03/2018

3.3. Caso de error indeterminado en el análisis interferométrico (18/04/2019 → 30/04/2019)

Durante este periodo de tiempo hubo precipitación (52,6mm en 12 días).

Entre ambas fechas no se observó ninguna actividad agrícola relevante, aunque si se observaron trabajos de movimiento de tierras en algunas parcelas anexas al camino (acopio de material para acondicionar el camino), así como los trabajos de acondicionamiento del propio camino.

La humedad precedente no es la misma entre ambas tomas, pues había llovido el día previo e incluso el mismo día de la primera adquisición, mientras que no llovió en los tres días precedentes a la segunda adquisición.

Con una amplitud de deformación superior a los 15 cm el resultado del análisis interferométrico no responde a ninguna interpretación lógica relativa a los procesos de erosión-sedimentación, ni a los posibles efectos de la obra de acondicionamiento del camino central.

Debido a la existencia de lluvias en uno de los días de adquisición, se procedió a repetir el análisis entre los días 12-30/04/2019, con resultados de similar magnitud.

Se ha observado que durante estas fechas se produjo un reajuste de las órbitas de los satélites, si bien eso no debería ser motivo para los resultados obtenidos.

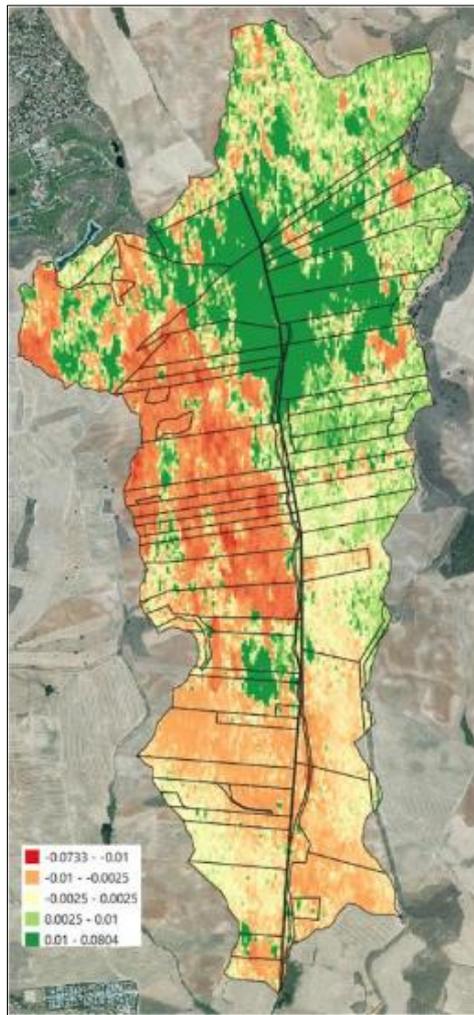


Figura 8: Resultados 18-30/04/2019

Con este ejemplo se quiere remarcar la necesidad de interpretar siempre los resultados, y más aún cuando no se encuentran dentro de la horquilla esperada, para descartarlos si no pueden ser explicados.

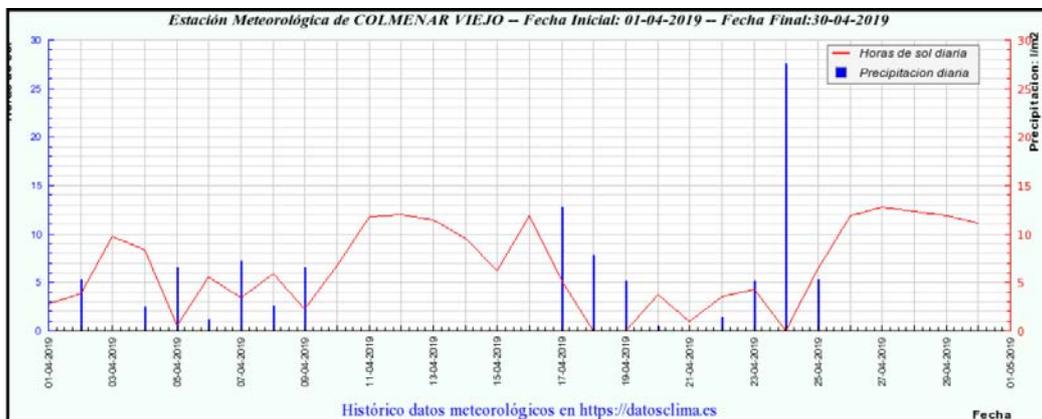


Figura 9: Lluvias en el periodo 18-30/04/2019

4. Conclusiones

La interferometría diferencial sobre imágenes TopSAR se presenta como una herramienta de gran utilidad para analizar la erosión que provocan eventos singulares de precipitación.

Su capacidad de análisis temporal, pudiendo analizar periodos de tiempo tan cortos como 6 días, permite analizar los eventos de precipitación de una forma prácticamente aislada.

Su capacidad de análisis espacial, con un resultado en raster con 13,93 m de paso de celda, permite conocer cómo reacciona cada zona de la cuenca a los procesos de erosión – sedimentación en función de la orografía, manejo del suelo, cobertura vegetal e intensidad de lluvia. Esto permitiría comprobar que situaciones comportan mayor riesgo, así como evaluar la eficacia de posibles medidas antierosión.

El sistema presenta además las siguientes ventajas:

Hay adquisiciones disponibles cada seis días. Y gratuitas.

Al ser un sensor activo basado en las microondas de banda C, funciona independientemente del día y la noche y de la existencia de nubes.

Las mediciones no se ven afectadas por cultivos pequeños como los cereales (trigo y cebada).

Pero se debe de atender a las siguientes limitaciones:

Diferentes estados de saturación del suelo durante las adquisiciones provocarán una falsa deformación a evaluar y corregir, debido a la escasa capacidad de penetración en el suelo seco y la nula capacidad de penetración en el agua de las microondas de la banda C.

Las zonas encharcadas durante la captación de las imágenes darán una falsa sedimentación, debido a la incapacidad de las microondas de la banda C de penetrar el agua.

Cuando la erosión hace desaparecer por completo el primer horizonte de suelo se produce una pérdida de coherencia entre las imágenes que no asegura la fiabilidad de las mediciones obtenidas.

Las mediciones se van afectadas por vegetación arbórea, o de hojas o fruto de gran tamaño y densidad.

Es necesario comprobar si las deformaciones registradas se han podido deber a otro fenómeno distinto de la erosión-sedimentación, como pueden ser terremotos, subsidencias, expansión de las arcillas, etc.

La lluvia en el preciso momento de una de las adquisiciones puede provocar una pérdida de coherencia que altere significativamente los resultados.

Los resultados siempre deben de ser interpretados y, a ser posible contrastados parcialmente sobre el terreno (no hace falta verificar toda la cuenca, pero si es conveniente algún punto de control para dar validez a la totalidad de la cuenca), máxime si se obtienen resultados que no respondan a las condiciones de precipitaciones y laboreo acaecidas.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la institución “Cátedra Rafael Dal-Ré/TRAGSA” por la ayuda prestada para el desarrollo de la investigación de doctorado de Francisco A. Sánchez-Crespo.

Referencias

1. Peter, H., Jäggi, A., Fernández, J., Escobar, D., Ayuga, F., Arnold, D., Wermuth, M., Hackel, S., Otten, M., Simons, W., Visser, P., Hugentobler, U., & Féménias, P. 2017. Sentinel-1A–first precise orbit determination results. *Advances in space research*, 60 (5), 879-892.
2. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B.Ö., Floury, N., Brown, M., Traver, I.N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L’Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M., Rostan, F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sens. Environ.* 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

3. De Zan, F., & Guarnieri, A. M., 2006. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(9), 2352-2360.
4. Ferreti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. 2007. TM-19 InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. European Space Agency. http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications
5. Geudtner, D., Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., Rommen, B. 2014. Sentinel-1 system capabilities and applications. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International* (pp. 1457-1460). IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946711
6. Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., Vachon, P. W., 1999. Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 135-149. DOI: 10.1109/36.739146
7. Martone, M., Bräutigam, B., Rizzoli, P., Gonzalez, C., Bachmann, M., Krieger, G. 2012. Coherence evaluation of TanDEM-X interferometric data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.06.006>
8. Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K., Talgre, L. 2016. Relating Sentinel-1 interferometric coherence to mowing events on grasslands. *Remote Sens.* 8, 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs8100802>
9. Koch, B. 2010. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6), 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.09.001>
10. Engdahl, M., Minchella, A., Marinkovic, P., Veci, L., Lu, J. 2012. NEST: an ESA open source toolbox for scientific exploitation of SAR data. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International* (pp. 5322-5324). IEEE. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6352406
11. Zuhlke, M., Fomferra, N., Brockmann, C., Peters, M., Veci, L., Malik, J., Regner, P. 2015. SNAP (sentinel application platform) and the ESA sentinel 3 toolbox. In *Sentinel-3 for Science Workshop* (Vol. 734, p. 21).
12. Chen, C. W. Zebker, H. A. 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America A*, 17, 401-414.
13. Chen, C. W. Zebker, H. A. 2001. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, *Journal of the Optical Society of America A*, 18, 338-351.
14. Chen, C. W., Zebker, H. A. 2002. Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1709-1719.
15. Paloscia, S., Macelloni, G., Pampaloni, P., Sigismondi, S. 1999. The potential of C-and L-band SAR in estimating vegetation biomass: the ERS-1 and JERS-1 experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (4), 2107-2110. DOI: 10.1109/36.774723
16. ESA and Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2018. EO College Course "Echoes in Space". <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>
17. González, P. J., Bagnardi, M., Hooper, A. J., Larsen, Y., Marinkovic, P., Samsonov, S. V., Wright, T. J. 2015. The 2014–2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical research letters*, 42 (21), 9239-9246. <https://doi.org/10.1002/2015GL066003>
18. Massonnet, D., Feigl, K. L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Rev. Geophys.*, 36 (4), 441–500, doi: 10.1029/97RG03139.
19. Spreckels, V., Wegmüller, U., Strozzi, T., Musiedlak, J., Wichlacz, H. C. 2001. Detection and observation of underground coal mining-induced surface deformation with differential SAR interferometry. In *ISPRS Workshop" High Resolution Mapping from Space* (pp. 227-234)
20. Salvi, S., Stramondo, S., Funning, G.J., Ferretti, A., Sarti, F., Mouratidis, A. 2012. The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle. *Remote Sens. Environ.* 120, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.029>
21. Barboux, C., Strozzi, T., Delaloye, R., Wegmüller, U., Collet, C. 2015. Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 109, 178-192. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.010>
22. Colesanti, C., Wasowski, J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 88, 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>

X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA
X CONGRESSO IBÉRICO DE AGROENGENHARIA

3 – 6 septiembre 2019, Huesca - España

23. Anghel, A., Vasile, G., Boudon, R., d'Urso, G., Girard, A., Boldo, D., Bost, V. 2016. Combining spaceborne SAR images with 3D point clouds for infrastructure monitoring applications. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 111, 45-61.
24. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.11.008>
25. Di Martire, D., Iglesias, R., Monells, D., Centolanza, G., Sica, S., Ramondini, M., Pagano, L., Mallorquí, J.J., Calcaterra, D. 2014. Comparison between Differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy). *Remote Sens. Environ.* 148, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014>
26. Schumann, G. J. P., Moller, D. K. 2015. Microwave remote sensing of flood inundation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 84-95.
27. Francisco A. Sánchez-Crespo, Francisco Ayuga, Ana I. García. Interferometría como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía. Jornadas de Ingeniería Rural Homenaje a Rafael Dal-Ré. Universidad Politécnica de Madrid, España, 16-17/01/2017.
28. Francisco A. Sánchez-Crespo, Francisco Ayuga, Ana I. García. Interferometría como herramienta para el estudio localizado de la erosión por escorrentía. IX Congreso Ibérico de Agroingeniería (Braganza, Portugal, 4-6/09/2017)
29. Francisco A. Sánchez-Crespo, Francisco Ayuga, Ana I. García. Differential Interferometry as a Tool for Localized Study of Runoff Erosion. AgEng 2018 Conference (Wageningen, Netherlands, 7-11/07/2018)